

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征

王禹冰¹, 王晓燕^{1,2*}, 庞树江¹, 杨晓明¹, 刘洋¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 首都师范大学首都圈水环境研究中心, 北京 100048)

摘要: 作为重要的城市饮用水源地, 水库是人工筑坝形成的特殊类型的水体, 其水质直接影响居民的饮用水安全. 为揭示北京市饮用水源地密云水库的秋季分层特征和细菌群落的垂直变化, 于水体稳定分层期(秋季)在水库进行采样, 应用16S rDNA末端限制性片段长度多态性(T-RFLP)和定量PCR等方法研究了密云水库水体细菌群落的垂直分布特征, 并利用聚类分析、多元统计分析揭示细菌群落与环境因子之间的响应关系. 结果表明:①密云水库水体温跃层位于水深20~30 m处, 水温范围在15~19℃, 聚类分析将7个采样水层划分为好氧区(上层)和缺氧区(下层)两类, 温度、DO、pH在15 m以下逐渐降低, 电导率、氨氮、硝态氮、亚硝态氮及总氮在15 m后发生显著变化, 水体水质表现出明显的垂直分布特征; ②RDA分析结果显示, 上下水层的溶解氧、pH、电导率、氨氮、硝态氮和亚硝态氮存在较为明显的垂向变化, 是影响密云水库细菌群落垂直分布的主要环境因子; ③总细菌的数量随水深变化的波动较为明显, 其中好氧区细菌的Shannon-Wiener指数和T-RFs片段数明显高于缺氧区, 说明秋季密云水库水体中细菌群落分布存在显著的分层现象. 本研究探究了水体热分层对水库水质及细菌群落的影响, 可为预测水质变化和水库管理提供科学依据.

关键词: 热分层; 密云水库; 环境因子; 细菌群落分布; 末端限制性片段多态性(T-RFLP)

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2745-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809074

Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir

WANG Yu-bing¹, WANG Xiao-yan^{1,2*}, PANG Shu-jiang¹, YANG Xiao-ming¹, LIU Yang¹

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Research Center of Aquatic Environment in the Capital Region, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: As an important urban drinking water source, reservoirs are a special type of water body formed by artificial dams. Water quality of reservoirs directly affects the residents' drinking water safety. In order to reveal the characteristics of stratification and vertical changes of bacterial communities in the Miyun Reservoir, a drinking water source of Beijing, vertical stratified samples were collected during the stable stratified period of the reservoir (autumn). The vertical distribution characteristics of bacterial communities in the Miyun Reservoir were studied by using 16S rDNA terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) and quantitative PCR. Cluster analysis and multivariate statistical analysis were used to reveal the response relationships between bacterial communities and environmental factors. The results were as follows. ① The thermocline of the Miyun Reservoir was located at a water depth of 20-30 m, and the water temperature range was 15-19℃. The cluster analysis data of the seven sampled water layers were divided into an aerobic area (upper layer) and anoxic area (lower layer). The temperature, dissolved oxygen, and pH gradually decreased below 15 m. The electrical conductivity, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, and total nitrogen changed significantly after 15 m. The water quality showed obvious features in the vertical direction. ② The redundancy analysis (RDA) results showed that there were obvious vertical changes in the dissolved oxygen, pH, electrical conductivity, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, and nitrite nitrogen between the aerobic and anoxic water layer. Those factors were the main environmental factors affecting the vertical distribution of the bacterial communities in the Miyun Reservoir. ③ The total bacterial number fluctuated with changes in the water depth. The Shannon-Wiener index and the number of T-RFs of bacteria in the aerobic zone were significantly higher than those in the anoxic zone, which indicates that there was significant stratification in the distribution of bacterial communities in the water of the Miyun Reservoir in autumn. This study explored the effects of water stratification on reservoir water quality and bacterial communities, and the findings provide a scientific basis for predicting water quality changes and reservoir management.

Key words: thermal stratification; Miyun Reservoir; environmental factors; bacterial community distribution; terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP)

水体热分层是湖泊系统中最常见的物理过程, 被认为是诱发水体溶解氧分布、沉积物营养盐释放、上下层水流混合和对流等现象的主要因素^[1-3]. 作为人工筑坝形成的一类特殊的湖泊, 水库具有与湖泊相似的性质. 在夏秋季气温较高时期, 水库特别是深水型水库由于上下水层密度不同易产生类似天然湖泊水体的热分层现象^[4], 导致水

库水体垂向形成包含“变温层-温跃层-等温层”的分层结构. 其中, 温跃层能够阻碍水体的上下层混

收稿日期: 2018-09-09; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 北京市自然科学基金委员会-北京市教育委员会联合资助项目(KZ201810028047); 科技创新服务能力建设-基本科研业务费(科研类)(025185305000/149)

作者简介: 王禹冰(1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: lwyubing@163.com

* 通信作者, E-mail: wangxy@enu.edu.cn

合,进而影响水体溶解氧分布^[5],最终可能导致底层水体缺氧,引起沉积物营养盐释放,使水体富营养化程度增加^[6];随着分层现象的消退,水体下层内源负荷向上层水体扩散,极易导致突发性水质恶化事件发生^[7,8].曾明正^[9]对周村水库的研究就提出,在水体热分层时期,温跃层的存在会导致下层水体溶解氧降低和营养盐积累,而在水体分层结构消失时,下层水体营养盐和还原性物质被交换至上层,影响水库水质.董春颖等^[10]对千岛湖的研究则提出,水体分层结构的形成和消失交替不利于水质量的保障和水生生态系统的稳定.因此,湖库水体热氧分层现象已成为学术界和相关环境部门广泛关注的热点问题.

作为水环境中的消费者和分解者,水库生态系统的细菌种类多样且数量众多,其对水库生态系统的稳定具有重要的环境学意义^[11].细菌群落对环境的变化响应快速,对水质具有较强的指示作用^[12,13],因而细菌群落的多样性常被用作监测和预测水生生态系统健康与否的标准.相关研究认为,水体热分层使得不同水层水体的物理特性和物质分布具有明显差异^[14],不同水层具有不同的生境,这导致细菌群落分布在各水层差别较大,因此研究细菌群落沿水体垂直分布对了解水体热分层对水库水质的影响具有重大意义.目前,已有部分学者对水库分层时期微生物群落结构特征进行了相关研究.例如,Yu等^[14]对亚热带深水水库分层时期真核微生物群落特征进行了研究,并提出了防止藻类水华形成的管理措施;Wang等^[15]研究了水体热分层对固氮微生物的影响,对固氮微生物的群落结构在不同季节和水层的差异进行了讨论;Yang等^[16]利用 Biolog 方法和高通量测序研究了金盆水库分体分层期的细菌群落组成和功能多样性,表明了细菌群落组成与水体分层密切相关.国内对深水水库水体热分层时期微生物群落结构虽已有部分相关研究,但研究区域较为集中.

密云水库是典型的大型湖泊型水库,水体滞留时间长,属于稳定分层型水库^[17].但是,分层时期密云水库的垂向水质变化对细菌群落的影响等机理过程尚不明确,有必要开展进一步研究加以阐明.作为北京唯一的大型城市生活饮用水水源地,密云水库水质情况直接影响着居民的生命健康安全.研究密云水库水体分层期的细菌群落结构特征,对保护水质具有重要意义.因此,本研究选择在水体稳定分层期——秋季,在密云水库大坝位置进行垂直采样调查,测定了水体理化指标垂直分层特征;并用16S rDNA末端限制性片段多态性(T-RFLP)和定

量 PCR 的分析方法分析了细菌群落垂直分布,揭示密云水库秋季水体热分层特征及细菌群落垂直分布状况,分析水体热分层对水库水质的影响,以期水质变化预测和水库管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 区域概况及样点布设

密云水库(116°50'E, 40°23'N)位于北京市密云区的东北方向,南距密云城区约23 km,处在燕山群峰之中,横跨潮白两河,建有潮河、白河两道拦水主坝,是一个典型的山谷型和半山谷型水库,分为白河、潮河、内湖这3个库区.水域面积188 km²,总库容43.75亿 m³,最大水深43.5 m,平均水深30 m.研究认为,密云水库水体存在分层现象,分层时间从春夏之交持续到秋季^[17].与自然湖泊不同,水库水体一般在大坝位置水深最深,易产生稳定分层结构^[18,19].基于此,本研究选取密云水库潮河主坝前水源九厂进行垂直分层采样,采样站点最大水深为32 m.采样时间为2014年秋季年9月水体稳定分层期,采样点分布以水温、溶解氧变化特征为参考,每5 m设置一个采样点,共采集7个垂直水层的样品,分别是0、5、10、15、20、25和30 m.

1.2 水质理化分析

用不锈钢采水器取样,采样瓶为经过75%酒精消毒的500 mL高密度聚乙烯瓶,每个样点共采集样品2 L,于4℃冷藏运回实验室,并在24 h内进行分析.

需分析测定的环境参数包括:温度、电导率、pH和溶解氧(DO);总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)和硝态氮(NO₃⁻-N).其中,需要现场测定水质参数包括水温、电导率、pH和溶解氧,测定方法采用多参数水质测量仪(HYDROLABMS5, HACH, 美国);实验室内测定指标包括TP、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和NO₃⁻-N,测定方法为FIAstar连续流动注射分析仪(FIAstar 5000, FOSS, 丹麦)^[20].

1.3 分子微生物技术

1.3.1 总DNA提取

回到实验室后,立即取1 L水样摇匀后进行过滤,首先用孔径为30 μm的滤膜过滤去除杂质,再用孔径为0.22 μm的微孔滤膜真空泵抽滤,滤膜在-80℃冰箱保存备用.将带有微生物的微孔滤膜装入50 mL灭菌离心管中,按照试剂盒说明书(E. Z. N. A.® Water DNA Kit, Omega Bio-Tek, USA)提取过滤水样中的总DNA,提取的DNA样品置于

-20℃ 冰箱保存备用^[21]。

1.3.2 PCR 扩增

选用细菌通用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'); 1492R (5'-GGTACCTTGTTACGACTT-3') 对细菌 16S rDNA 基因进行扩增, 其中前引物 5' 端进行 FAM 荧光标记。PCR 扩增采用 50 μL 反应体系: DNA 模板 10 μL, 前后引物各 2 μL, 2 × Taq PCR Master Mix 25 μL, 加双蒸水 (ddH₂O) 至总体积为 50 μL。PCR 反应程序设置如下: 预变性条件为 94℃, 5 min; 94℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 1.5 min, 共进行 30 个循环; 最后 72℃ 延伸 10 min。

1.3.3 T-RFLP 分析

PCR 扩增产物用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测扩增效果。使用 TIANquick Mini Purification Kit 纯化试剂盒 (TIANGEN BIOTECH, 北京) 对 PCR 产物切胶纯化, 回收产物采用限制性内切酶 *Hha* I (Takara 宝生物工程有限公司, 大连) 进行酶切。酶切产物送至上海基康公司测定。扫描结果采用 Peak Scanner Software v1.0 分析。

1.3.4 荧光定量 PCR

采用 SYBR Green 法, 由 ABI7500FAST 型荧光定量 PCR 仪进行 16S rDNA 的实时荧光定量分析 (RT-qPCR)。定量 PCR 试剂使用上海睿安生物公司的 SybrGreen qPCR Master Mix (2X)。以 16S rRNA 为内参, 引物对为 Eub338 (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 Eub518 (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3')。采用 25 μL 体系: SybrGreen qPCR Master Mix (2X) 12.5 μL、引物 F (10 μmol·L⁻¹) 和引物 R (10 μmol·L⁻¹) 各 0.5 μL、ddH₂O 9.5 μL、DNA 模板 2 μL。PCR 反应条件: 95℃ 预变性 10 min; 95℃ 变性 45 s, 60℃ 退火 1 min, 72℃ 延伸 1 min, 共 40 个循环; 最终 72℃ 延伸 1 min^[22]。每个样品做 3 组平行求取平均值, 扩增效率为 100%, 相关系数为 0.99。

1.4 数理统计方法

利用 Excel 2013 软件对理化指标和细菌丰度进行分析处理, 以 Origin 9.0 对各数据进行绘图, 通过 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 及 Pearson 相关性分析。

各水层细菌 16S rDNA 基因扩增产物经 *Hha* I 酶切后, 舍去小于 50bp 和大于 500bp 的 T-RF^[23], 将差异小于 0.5bp 的 T-RF 视为相同片段^[24], 对剩余片段峰面积进行标准化处理, 去掉相对丰度小于 1% 的片段, 共得到 41 种不同的 T-RFs 片段, 每个片段至少代表一种细菌^[21]。利用 PRIMER 5.0 软件

对 T-RFLP 谱图进行分析, 得到的 41 个典型 T-RFs 的相对峰面积为原始矩阵, 借助 PRIMER 5.0 软件基于 Bray-Curtis 相似性系数做出聚类图分析各样点的相似性 (Similarity)。同时, 计算细菌群落物种的多样性指数, 用 Shannon 指数 (*H*) 表示物种多样性、用 Margale 指数 (*D*) 表示物种丰富度, 用 Pielou 指数 (*J*) 表示物种均一度。

借助 CanoDraw for Windows 4.5 对样方进行排序分析。以 7 个样本中细菌菌群的相对丰度组成的物种矩阵和 9 种环境参数组成的环境变量矩阵为基础数据进行 DCA (detrended correspondence analysis) 排序, 得到排序轴最大梯度长度小于 3.0, 说明细菌群落对环境梯度是线性响应关系, 因此选用直接梯度冗余分析法 (RDA) 得到样方、物种、环境因子相互关系的二维排序图。

2 结果与分析

2.1 水体理化因子垂直分布特征

密云水库各采样水层水体理化指标测定结果如图 1 所示。有研究指出, 当水体垂直温度变化大于或等于 0.2℃·m⁻¹ 时, 表明此时水体具有温跃层结构^[25]。由图 1(a) 可见, 水体在水深 0~20 m 之间温度保持在 19.0~19.4 之间, 在 20~30 m 处温度发生显著变化 ($P < 0.05$), 从 19℃ 降至 15℃, 形成水体温跃层。由于密云水库的温跃层位置较深, 因而温跃层之下没有明显的等温层存在, 这与传统“三层”层化模式有所不同。除 TP 外, 其余各项指标在 0~15 m 处均无明显变化, 表明此时密云水库水质在垂向上混合均匀。但是, 在 15 m 以下, 温跃层或温跃层附近各项指标发生急剧变化, 表现出明显的垂直分布特征。

DO 随温度的下降呈现上高下低的变化趋势 [图 1(b)], DO 在水深 20~25 m 处显著降低 ($P < 0.05$), 由 5.43 mg·L⁻¹ 骤降至 3.24 mg·L⁻¹, 水深 20 m 以下 DO 浓度小于 4 mg·L⁻¹, 水体转变为缺氧状态^[10]。DO 与温度具有显著相关性, 相关系数为 0.825 ($P < 0.05$), 表明温度突变是影响水体溶解氧变化的重要因素。电导率在水深 0~15 m 保持恒定, 在 15~30 m 随着水深的增加而上升 [图 1(c)], 电导率与 DO、pH、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 之间均有极显著负相关性 ($P < 0.01$), 与 NH₄⁺-N 具有极显著正相关性 ($P < 0.01$), 说明水底溶解性离子浓度较高, 三态氮是水体中溶解性离子的重要组成。密云水库 pH 0~15 m 处保持在 8.7, 在 15~30 m 处发生显著变化 ($P < 0.05$), 降至 7.9 [图 1(d)], 水体整体呈弱碱性。

NO_2^- -N和 NO_3^- -N的变化趋于一致 [图 1(e)和 1(f)], 在水体上层含量较高, 在 25 ~ 30 m 处显著减少 ($P < 0.05$). NH_4^+ -N 则是在 20 m 后显著增加 ($P < 0.05$), 在 30 m 处达到最大值 $0.264 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 1(g)]. TN 在温跃层之上逐渐降低, 到达温跃层之后迅速上升, 在底层达到最高值 $0.276 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 1(h)], TN 在底层最高可能是由于底泥中氮的溶

解释放导致^[6]. 在水库上层 1 ~ 20 m, NO_3^- -N 占 TN 比例最高是 45.6% ~ 63.8%, 下层 25 ~ 30 m, NH_4^+ -N 占 TN 比例较大是 67.5% ~ 76.5%. NO_3^- -N 是密云水库氮的主要赋存形态, 其次是 NH_4^+ -N, NO_2^- -N 最小. TP 在各水层间变化显著 ($P < 0.05$), 变化范围为 $0.001 \sim 0.048 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变化趋势呈现波浪形.

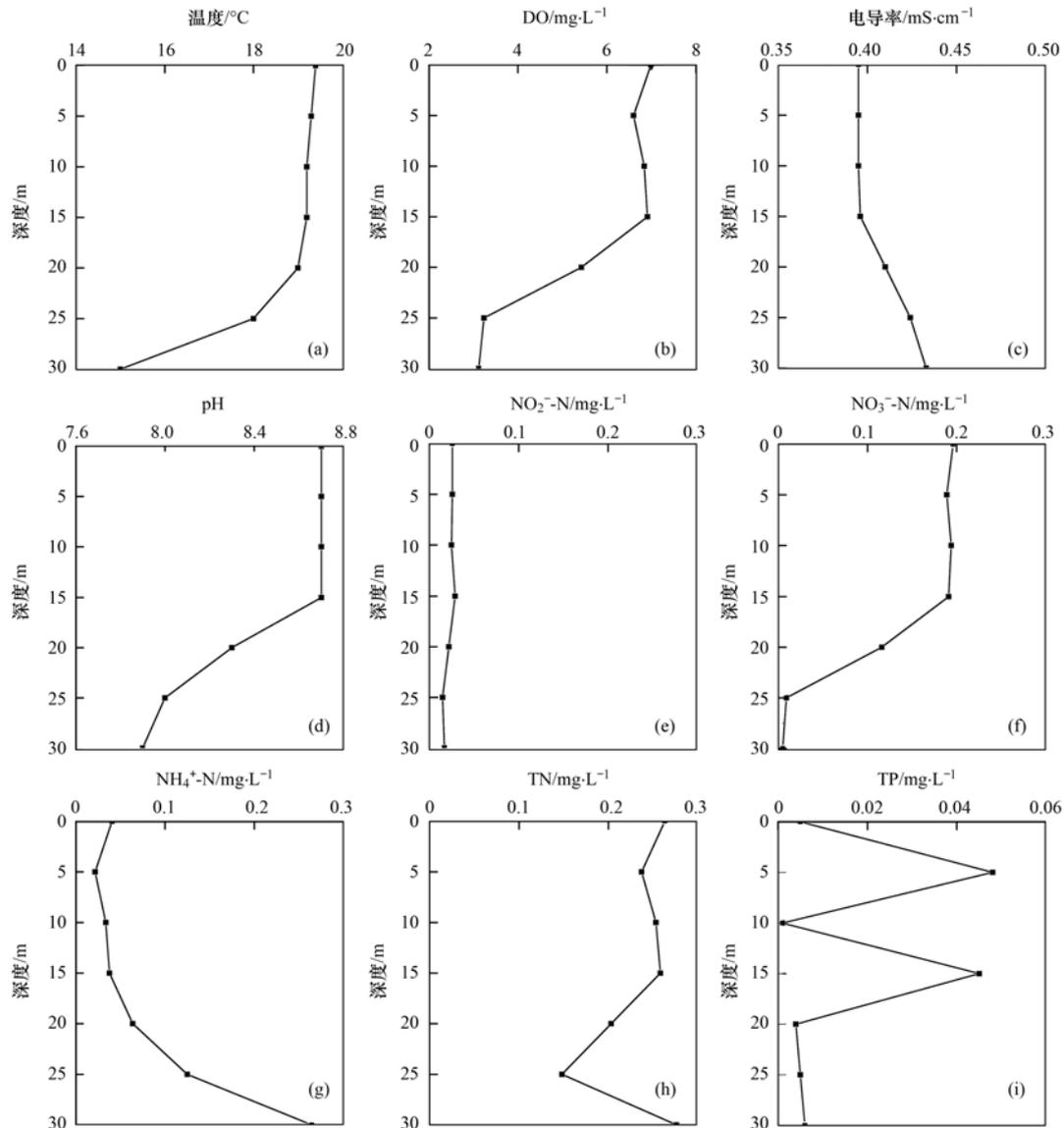


图 1 密云水库各采样水层水体环境参数

Fig. 1 Environmental variables of water samples at different depths in the Miyun Reservoir

2.2 水体细菌丰度垂直分布特征

细菌的16S rDNA拷贝数常用于表征环境样品中的细菌丰度, 拷贝数越大, 细菌丰度越高. 密云水库垂直分层水体的细菌丰度结果如图 2 所示. 从中可知, 样品中细菌的16S rDNA拷贝数波动范围在 $4.48 \times 10^5 \sim 3.86 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间, 随水深垂直变化波动较大, 在水深 5 m 处含量最高, 水深 20 m 处含量最低. 20 m 以下细菌的16S rDNA拷贝数

随着水深的增加逐渐上升, 在 30 m 时上升至 $2.70 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$. 总体来看, 密云水库水体垂直细菌的丰度总趋势是上层好氧区 (0 ~ 15 m) 细菌丰度高于下层缺氧区 (20 ~ 30 m).

2.3 不同水层水体细菌多样性分析

表 1 中筛选了各水层相对丰度大于 1% 的片段个数, 并将相对丰度大于 5% 的片段选为优势片段. 从片段个数来看, 20 m 处细菌多样性最低, 水体上

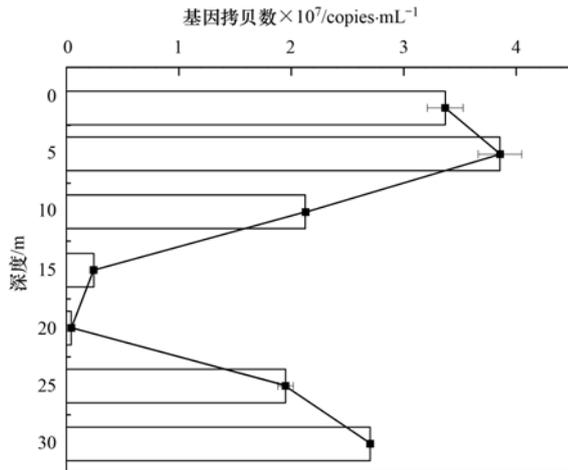


图2 各采样水层细菌 16S rDNA 基因拷贝数

Fig. 2 Abundance of bacterial 16S rDNA genes of water samples at different depths

层好氧区 T-RFs 片段个数高于下层缺氧区, 表明上层水体中细菌多样性高于下层水体. 7 个水层共筛选出 9 个不同的优势菌种, 其中 366bp 为各水层共有菌种, 是密云水库绝对优势菌; 63bp 和 79bp 为表层(0~15 m)特有; 59bp 和 93bp 为下层(20~30 m)特有, 上下水层优势菌种分布具有明显差异.

表1 各采样水层 T-RFs 代表的优势菌分布情况

Table 1 Distribution of dominant bacteria in water samples collected at different depths

水深/m	片段个数	优势片段长度/bp
0	19	79, 206, 359, 366
5	24	63, 67, 79, 206, 359, 366
10	16	67, 206, 231, 359, 366
15	24	206, 359, 366
20	9	59, 93, 206, 359, 366
25	22	59, 359, 366
30	15	59, 67, 206, 231, 366

图3 给出了各水层细菌多样性指数结果. Shannon 指数可以反映环境中物种的多样性, 物种多样性越高, 指数越大; Pielou 指数能够反映物种数目的分配情况, 其值越大代表物种分配越平均; Margale 指数能够反映物种的丰富度, 物种越多, 丰富度越高, 则其值越大. 可见, 密云水库垂向细菌的 Margale 指数与 Shannon 指数随水深的变化趋于一致, 最高值均出现在 5 m 水层处, 说明表层水体细菌种数最多, 且 16S rDNA 的丰富度和多样性最高; 在 20 m 水层处最低, 且 Pielou 指数最高, 即 16S rDNA 的多样性和物种丰富度最低. 整体看来, Margale 指数和 Shannon 指数大致呈现出表层(0~15 m) 高于底层(20~30 m) 的特征.

利用 Primer 5 对各水层的 T-RFs 组成进行基于 Bray-Curtis 相似性系数的聚类分析(图4). 由图4

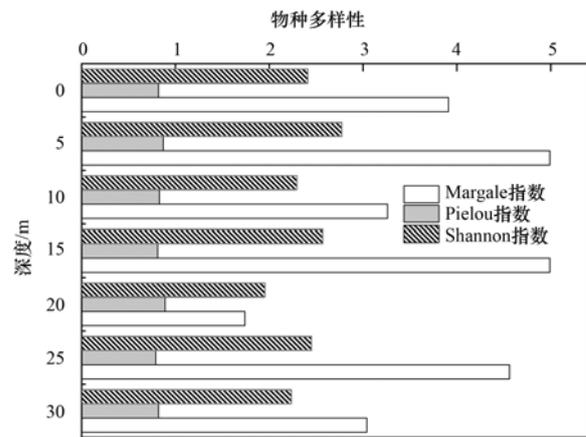


图3 各水层主要 T-RFs 的相对含量

Fig. 3 Relative abundance of the dominant T-RFs of water samples collected at different depths

可得, 当取相似度为 35.20% 时, 7 个水层的细菌群落聚为两类, 第 I 类为好氧区水层, 包括 0、5、10 和 15 m 水层; 第 II 类为厌氧水层, 包括 20、25 和 30 m 水层. 另外, 细菌群落的聚类结果与多样性指数结果分区基本一致.

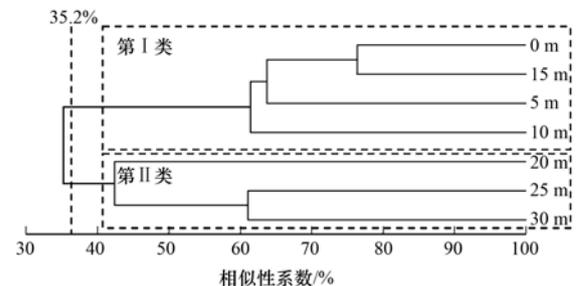


图4 各水层 T-RFs 组成聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of the T-RF composition of water samples collected at different depths

2.4 理化因子与细菌群落关系

对 T-RFs 代表的细菌群落信息和环境因子进行 RDA 分析(图5). 结果显示, 排序轴 AX1 和 AX2 的解释度分别为 69.70% 和 15.80%, 表明排序图能够解释大部分信息. 排序轴 AX1 的特征值最大, 说明环境因子沿 AX1 的变化对细菌群落的分布影响最大. 进一步来看, 与 AX1 相关性较高的环境因子是 NO_2^- -N 和 DO, 相关系数为 -0.9661 和 -0.9494 , 呈显著负相关($P < 0.01$), 表明在 AX1 上 NO_2^- -N 和 DO 是影响细菌群落分布的主要影响因素. 与排序轴 AX1 相关性较高的影响因子还包括 NO_3^- -N (-0.9493)、pH (-0.9202) 和电导率 (0.8906). 另一方面, 水温和 TN 是排序轴 AX2 的主要影响因素.

排序轴 AX1 将各水层分为两部分, 上层好氧区水层 1、5、10 和 15 m 位于 RDA 排序图左侧(见

图 5 中实心圆点 1~4), 而底层缺氧区水层 20、25 和 30 m 位于排序图右侧 (见图 5 中实心三角 5~7), 与聚类分析结果一致. 其中, 10 m 水层处细菌群落分布受总氮影响最大, 而 0 m 和 15 m 水层细菌群落较为相似, 主要受 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 影响较大, 25 m 和 30 m 水层与 NH_4^+ -N 相关性较大.

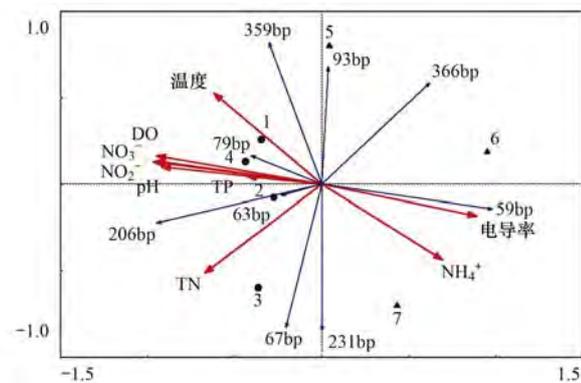


图 5 密云水库优势种与环境因子的关系

Fig. 5 Correlation analysis of the dominant bacterial communities of water samples in the Miyun Reservoir and environmental factors

3 讨论

3.1 水库水体热分层条件下水质分布特征

大型深水库在夏秋季太阳辐射强时, 水体会因温度差异导致垂向水体密度不同而形成稳定结构^[26], 出现较为明显的分层现象, 季节性分层是水体物理、化学、生物过程的基础, 影响水体水质分布和微生物群落结构^[27-30]. 密云水库水体在秋季有明显分层现象, 在 20~30 m 处形成水体温跃层, 以此为界限, 水体 DO 值随水深下降而显著下降, 这与孙祥等^[31]对天目湖和俞焰等^[32]对千岛湖的研究结果一致, 表明水体热分层对 DO 含量影响显著, 阻碍水体表层向底层的耗氧补偿^[33], 且沉积物需氧量为水体的 2~6 倍^[34], 氧气消耗导致水体底层形成缺氧区. 水底的缺氧环境会引起沉积物中溶解性物质释放, 水体底部离子浓度升高^[35], 使得电导率在 30 m 处表现出最大值. 且水体热分层结构同样阻碍营养盐的上下交换, 使得上下层水体营养盐分布差异显著. 商潘璐等^[27]对金盆水库热分层时期水质分布特征也表明在水体分层状态下, 水质参数在不同水层产生了显著垂向变化. 同样, 王琳杰等^[28]对抚仙湖的研究也指出在温度变化区, 抚仙湖夏季热分层结构明显限制了各个水层间的物质交换, 影响了水体化学成层特征.

3.2 水库水体热分层时期细菌群落分层特征及影响因素

由细菌丰度和多样性分析结果可知, 细菌群落

结构变化在水体垂直方向上具有一定规律性, 并且与水体热分层现象密切相关. 密云水库水体在秋季时期可垂直分为两个区域, 即上层好氧区 (0~15 m) 和下层缺氧区 (20~30 m), 总体上层水体细菌丰度和群落多样性高于下层水体. 温跃层的存在使得上下水层物理化学性质差异明显, 形成了不同环境的栖息地, 栖息地异质性是影响细菌群落的重要因素^[16, 36], 因此上下水层细菌群落结构差异较大. 其中, 上层水体水温较高, 水温升高细菌多样性会增加^[37], 水体中含有的浮游生物由于光合作用也可为细菌提供更多的有机碳源和营养物质; 下层水体缺氧环境导致沉积物中污染物释放, 水温偏低等多种因素均可能会抑制细菌的活性, 影响细菌丰度和群落多样性. 水体分层会导致细菌群落对水体有机污染物的不均匀代谢, 降低细菌群落对有机污染物的降解能力, 加剧底层水体水质恶化^[38]. 但是, 本研究结果与东圳水库^[29, 39]的细菌群落垂直分布略有不同, 东圳水库上层好氧区细菌多样性指数和 DGGE 条带数显著低于下层缺氧区, 这可能是由于溶解氧含量的差异. 密云水库下层水体溶解氧最低为 $3.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而东圳水库下层水体氧含量仅为 $0.20 \sim 0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 更适于厌氧菌生长. 此外, 也可能与水库深度不同及所处的地域的水文气象条件差异有关. 由于南北方地域及环境因子差异, 可能导致细菌群落在不同库区上下水层水库分层不同. 具体而言, 东圳水库位于福建东南沿海地区, 水库营养盐指数比密云水库高, 而密云水库是北方典型水库水体, 营养盐水平和富营养化程度相对较低.

根据 RDA 分析结果可知, 细菌群落组成与 DO、pH、电导率、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 等环境因子具有较大相关性, 各项环境因子影响使得细菌群落聚为上层好氧区和下层缺氧区两类. 其中, 上层水体与 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 相关性较高, 而底层水体与 NH_4^+ -N 含量相关性较为密切. 究其原因可能是在好氧条件下, 硝化细菌能够将 NH_4^+ -N 氧化为 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N, 而反硝化细菌为厌氧菌, 在厌氧条件下硝化作用被抑制, 反硝化作用还原 NO_3^- -N 为 NH_4^+ -N, 因此在底层缺氧水体中, NH_4^+ -N 含量增加且与细菌群落具有较大相关性, 这与周菁等^[29]的研究结果具有较好的一致性. 有研究指出, 水体的热分层导致了环境因子的垂直变化, 进而会影响细菌群落在垂直方向上的分布, 致使上下水层水质形成差异, 如果水库发生长期分层, 饮用水的质量可能会受到不利影响^[40].

4 结论

(1) 密云水库水体在秋季具有明显的热分层结

构, 温跃层位于水体 20 ~ 30 m 处。温度、DO、pH 在 15 m 以下逐渐降低, 电导率、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 及 TN 在 15 m 后发生显著变化, 水体水质表现出明显的垂直分布特征。

(2) 水库水体热分层在一定程度上会影响细菌丰度和多样性。根据细菌的分布特征, 密云水库水体被分为上层好氧区和下层缺氧区, 与水体热分层结构一致, 其中上层水体细菌的丰度和多样性高于下层水体。

(3) DO、pH、电导率、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 等环境因子的分布特征与水体热分层存在明显的相关性。RDA 分析结果表明, 上述环境因子是影响密云水库细菌群落垂直分布的主要因子, 水体分层引起水质理化性质改变从而影响细菌群落分布, 如果水库发生长期分层, 密云水库饮用水的质量可能会受到不利影响。

参考文献:

- [1] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正. 溶解氧对湖库热分层和富营养化的响应——以枣庄周村水库为例[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1547-1553.
- Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z. Responses of dissolved oxygen on thermal stratification and eutrophication in lakes and reservoirs—An example in Zhoucun Reservoir in Zaozhuang City [J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1547-1553.
- [2] 刘树元, 郑晨, 袁琪, 等. 台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3702-3708.
- Liu S Y, Zheng C, Yuan Q, et al. Analysis on the variation characteristics of iron and manganese concentration and its genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3702-3708.
- [3] 白杨. 深水湖泊与浅水湖泊热分层特征及其影响因素[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- Bai Y. The characteristics of thermal stratification and its influencing factors in deep lake and shallow lake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [4] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 2008, 9(2): 135-142.
- [5] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China)[J]. Water Research, 2015, 75: 249-258.
- [6] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [7] Rigosi A, Rueda F J. Hydraulic control of short-term successional changes in the phytoplankton assemblage in stratified reservoirs[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 216-226.
- [8] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3046-3050.
- Liu L, Liu D F, Xiao S B, et al. Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3046-3050.
- [9] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1337-1344.
- Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, et al. Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir——Zhoucun Reservoir in North of China [J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1337-1344.
- [10] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2574-2581.
- Dong C Y, Yu Z M, Wu Z X, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574-2581.
- [11] 任丽娟, 何聃, 邢鹏, 等. 湖泊水体细菌多样性及其生态功能研究进展[J]. 生物多样性, 2013, 21(4): 421-432.
- Ren L J, He D, Xing P, et al. Bacterial diversity and ecological function in lake water bodies [J]. Biodiversity Science, 2013, 21(4): 421-432.
- [12] 钱玮, 范竟成, 王金虎, 等. 东太湖地区湿地水质与浮游细菌群落结构关联性研究[J]. 生物技术, 2017, 27(1): 85-91.
- Qian W, Fan J C, Wang J H, et al. Correlation analysis of water quality and the community structure of planktonic bacteria in the wetlands around eastern Lake Tai [J]. Biotechnology, 2017, 27(1): 85-91.
- [13] Paerl H W, Dyble J, Moisaner P H, et al. Microbial indicators of aquatic ecosystem change: Current applications to eutrophication studies [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 46(3): 233-246.
- [14] Yu Z, Yang J, Zhou J, et al. Water stratification affects the microeukaryotic community in a subtropical deep reservoir [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2014, 61(2): 126-133.
- [15] Wang L N, Yu Z, Yang J, et al. Diazotrophic bacterial community variability in a subtropical deep reservoir is correlated with seasonal changes in nitrogen [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(24): 19695-19705.
- [16] Yang X, Huang T L, Zhang H H. Effects of seasonal thermal stratification on the functional diversity and composition of the microbial community in a drinking water reservoir [J]. Water, 2015, 7(10): 5525-5546.
- [17] 李钟顺, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 密云水库水温分布特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(6): 798-803.
- Li Z S, Chen Y C, Liu Z W, et al. Water temperature distribution in the Miyun Reservoir [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2012, 52(6): 798-803.
- [18] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: A retrospective comment [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(2): 151-160.
- [19] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 447-454.
- Liu M L, Wu Z X, He J B, et al. Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 447-454.
- [20] 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 等. 人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3677-3688.
- Liu Y, Chen Y J, Wang X Y, et al. Influences of anthropogenic activities on the community structure of N-DAMO bacteria in the North canal [J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3677-3688.

- [21] 于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(3): 337-344.
Yu Y, Wang X Y, Zhang P F. Spatial distribution of planktonic bacterial community and its relationship to water quality in Beiyun River[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(3): 337-344.
- [22] Li M, Cao H L, Hong Y G, *et al.* Spatial distribution and abundances of ammonia-oxidizing archaea (AOA) and ammonia-oxidizing bacteria (AOB) in mangrove sediments[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 89(4): 1243-1254.
- [23] Burt W V. Verification of water temperature forecasts for deep, stratified reservoirs[J]. Water Resources Research, 1974, 10(1): 93-97.
- [24] Samad M S, Bertilsson S. Seasonal variation in abundance and diversity of bacterial methanotrophs in five temperate lakes[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 142.
- [25] 王银珠, 濮培民. 抚仙湖水温跃层的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 1982, (4): 1-9.
Wang Y Z, Pu P M. Preliminary study on the thermocline in Fuxian Lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1982, (4): 1-9.
- [26] Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 161: 179-190.
- [27] 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 等. 深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1141-1150.
Shang P L, Chen S N, Huang T L, *et al.* Vertical distribution of fungal community composition and water quality during the deep reservoir thermal stratification [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1141-1150.
- [28] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1384-1392.
Wang L J, Yu H, Niu Y, *et al.* Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian Lake during thermal stratification period in summer [J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1384-1392.
- [29] 周菁, 余正, 刘开国, 等. 典型亚热带热分层水库秋季细菌群落垂直分布[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6205-6213.
Zhou J, Yu Z, Liu K G, *et al.* Bacterial community and its relation to environmental variables in a subtropical stratified reservoir for drinking water supply in autumn[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6205-6213.
- [30] Pantoja-Agreda F, Otero-Morales E. Autotrophic picoplankton assemblages in subtropical reservoir: Temporal and vertical dynamics in abundance and biomass[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2017, 32(1): 17-28.
- [31] 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2632-2640.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, *et al.* Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2632-2640.
- [32] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1393-1402.
Yu Y, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-Island Lake and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1393-1402.
- [33] Antonopoulos V Z, Gianniu S K. Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece[J]. Ecological Modelling, 2003, 160(1-2): 39-53.
- [34] 苏露, 黄廷林, 李楠, 等. 分层型水源水库沉积物需氧量特性[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1159-1166.
Su L, Huang T L, Li N, *et al.* Characteristics of sediment oxygen demand in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1159-1166.
- [35] Müller S, Mitrovic S M, Baldwin D S. Oxygen and dissolved organic carbon control release of N, P and Fe from the sediments of a shallow, polymictic lake [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(3): 1109-1120.
- [36] Pouliot J, Galand P E, Lovejoy C, *et al.* Vertical structure of archaeal communities and the distribution of ammonia monooxygenase A gene variants in two meromictic High Arctic lakes[J]. Environmental Microbiology, 2009, 11(3): 687-699.
- [37] Fuhrman J A, Steele J A, Hewson I, *et al.* A latitudinal diversity gradient in planktonic marine bacteria[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(22): 7774-7778.
- [38] 杨霄. 分层型水库水体细菌群落演变机制与扬水曝气强化作用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
Yang X. Study on the evolvement mechanism of aquatic bacteria community and its enhanced effect by water-lifting aerator in stratified reservoirs [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [39] Yu Z, Yang J, Amalfitano S, *et al.* Effects of water stratification and mixing on microbial community structure in a subtropical deep reservoir[J]. Scientific Reports, 2015, 4: 5821.
- [40] Bohrer B, Schultze M. Stratification of lakes[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): RG2005.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)